

## 이온화를 고려한 플라즈마 경계영역 모델링과 실험 측정의 비교를 통한 플라즈마 내 티끌입자의 트랩 연구

박성종 · 선창래 · 최원호\*

한국과학기술원 물리학과 기체방전물리연구실, 대전 305-701

(2004년 3월 16일 받음)

플라즈마 내에 티끌입자가 유입되었을 때 형성되는 티끌입자 트랩(trap)은 플라즈마 공정 시 입자에 의한 기관 오염의 주 원인으로 알려져 있으며, 이들 티끌입자들이 보이는 진동 또는 파동이나 티끌결정 연구에 기초가 되는 중요한 현상이다. 본 연구에서는 이온화와 이온 및 중성종 충돌을 고려한 플라즈마 경계영역에 대한 1차원 모델링과 정전기력 및 중력과 더불어 이온끌이힘을 고려한 티끌입자의 역학 변수의 계산을 통해서 플라즈마 변수에 따른 티끌입자 트랩의 위치, 크기와 같은 물리적 특성에 대해 고찰하였다. 이와 더불어 저압 아르곤 직류 방전 플라즈마에 반경이  $0.07 \mu\text{m}$ ,  $1.55 \mu\text{m}$ ,  $2.5 \mu\text{m}$ 인 세 종류의  $\text{SiO}_2$  티끌입자를 주입하여 여러 플라즈마 조건에서 티끌입자들의 트랩을 관찰하였고, 이렇게 얻은 실험결과와 모델링 결과를 비교분석하여 플라즈마 내에서 티끌입자가 이루는 트랩현상의 전반적인 이해를 도모하였다.

PACS numbers: 52.27.Lw, 52.40.Kh, 52.27.Gr

Keywords: 티끌 플라즈마, 티끌입자 트랩, 충돌성 덮개

### I. 서 론

티끌 플라즈마는 일반적인 플라즈마 입자인 전자와 이온 외에도 큰 크기의 무거운 입자가 포함되어 전하중성(charge neutrality)을 이루고 있는 플라즈마 상태를 일컫는다. 천체 플라즈마는 그 자체가 티끌 플라즈마라 할 수 있고, 반도체 공정용 플라즈마 내에서는 비휘발성 공정 부산물의 엉김을 통해 나타나기도 한다. 실험실에서 발생 가능한 티끌 플라즈마의 경우, 보통 수십 나노미터 부터 수 백 마이크로미터 크기의 티끌입자가 포함되어 있으며 이러한 티끌입자는 주로 플라즈마와 벽 사이 경계영역에 트랩된다. 티끌입자와 관련한 최근 연구 동향을 보면 반도체소자의 고집적화에 따른 공정환경의 높은 청정도 요구와 맞물려 플라즈마 내 티끌입자의 진단 및 검출을 위한 선도적인 연구들이 있어 왔고 [1], 또한 입자의 크기 및 전하량이 전자와 이온에 비해 매우 큰 티끌입자의 특수한 성질로 인해서 새로운 파동현상과 [2] 티끌결정(dust crystal)이라 불리는 고체격자와 유사성을 갖는 강한 결합구조(strongly-coupled structure)가 발견되기도 하여 [3] 기초 플라즈마 물리를 탐구하는데 매력적인 대상으로 자리잡고 있다. 그림 1은 플라즈마 경계

영역에 트랩된 입자구름(dust cloud)을 보여주는 한 예로, 이렇게 나타나는 티끌입자의 트랩현상은 공정 플라즈마에서 입자에 의한 플라즈마 오염의 주요 원인으로 인식되고 있으며, 트랩된 입자구름의 형성조건은 플라즈마 변수와 밀접한 관련을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 트랩현상에 대한 이해는 티끌입자 거동제어의 단초를 제공하여 플라즈마 공정 시 오염제어 방법의 연구에 기초가 될 수 있다. 지금까지 티끌입자의 트랩현상은 고주파(RF)/직류(DC), 충돌성(collisional)/비충돌성(collisionless) 플라즈마로 분류하여 설명하려고 시도해 왔으나 [4], 플라즈마 경계영역에 대한 부정확한 모델을 사용하거나 모호한 경계조건을 사용하는 [5] 등의 이유로 인해 정성적인 의미를 파악하는데 만족해야 했다.

본 연구에서는 자기모순이 없는(self-consistent) 직류 충돌성 플라즈마 모델과 모호성이 없는 경계조건을 도입하여 [5], 전산모사와 실험 측정을 통해 티끌입자가 이루는 트랩에 대한 이해를 도모하였다. 우선, 전자온도, 플라즈마 밀도, 전위와 같은 플라즈마 변수의 공간적인 분포를 모델링으로 구하고 이를 바탕으로 입자에 대전된 전하량, 입자가 받는 힘과 같은 티끌입자의 변수들을 계산하였으며, 플라즈마 변수에 따른 트랩의 플라즈마 내 위치와 역학적인 특성들을 계산하여 실험치와 비교하였다. 그리고, 티끌입자들이 이루는 입자구름 경계에

\*E-mail: wchoe@kaist.ac.kr

서의 힘균형을 이용하여 플라즈마에 입자가 최대로 많은 양이 트랩되었을 때 입자구름의 크기가 얼마나 되는가에 대한 계산도 수행하였다.

II 절에서는 충돌성 플라즈마에 대한 모델과 입자의 수송변수 계산, 그리고 입자구름에 대한 힘균형들을 이론적으로 서술하였고, III 절에서는 실험장치의 구성에 대한 서술을, IV 절에서는 모델링의 결과 분석과 실험적으로 측정된 결과와의 비교 등을 통해 플라즈마 변수에 따른 티끌입자 트랩의 역학적인 특징에 대해서 논의하였고, 마지막으로 V 절에서는 연구내용을 요약하였다.

## II. 티끌입자 트랩 모델링

플라즈마 내에 티끌입자가 유입되면 주변에 존재하는 전자와 이온에 의해 대전이 되고, 대전된 티끌입자는 플라즈마 전위가 급격히 변화하는 플라즈마와 벽 사이의 경계영역에 트랩이 된다. 이를 수치적으로 모사하기 위해서, 먼저 플라즈마의 경계영역을 정확히 기술하는 모델을 도입하고, 이를 바탕으로 티끌입자의 전하량과 입자에 가해지는 힘 등의 변수들을 계산하여 단일입자 또는 입자구름 내에서의 힘균형을 다루고자 한다. 여기서 도입한 플라즈마 모델에서는 소량의 티끌입자들만이 플라즈마 내에 포함된 상황을 가정하여 티끌입자가 플라즈마에 주는 영향은 고려하지 않았다.

### 1. 이온화를 고려한 충돌성 플라즈마 모델

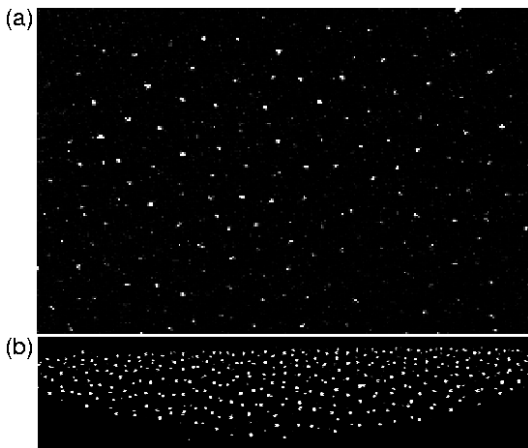


Fig. 1. Observed dust particle cloud trapped in an argon dc discharge: (a) top view, and (b) side view.  $P_{Ar} = 180$  mTorr,  $V_{cathode} = -320$  V, and dust radius =  $1.55 \mu\text{m}$ .

일반적인 직류방전 플라즈마의 경우 운전압력이 수십에서 수 백 mTorr에 이르기 때문에 이온과 중성종간의 충돌을 고려해야 한다. 또한 티끌입자의 크기가 작은 경우에는 전기장의 세기가 상대적으로 작은 앞덮개(presheath) 영역에서 트랩이 이루어질 수 있기 때문에, 높은 전자밀도를 유지하는 앞덮개영역을 충분히 설명하기 위해서 이온화효과도 함께 고려해야 한다. 전자의 관성효과를 무시하여 전자의 볼츠만 관계식을 도입하고, 이온-중성종간의 전하교환 충돌과 이온화에 의한 이온의 운동량 손실을 함께 고려하면, 정상상태에서 전자와 이온에 대한 1차원 수송방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d(n_i u_i)}{dz} = \nu_{iz} n_e, \quad (1)$$

$$m_i n_i u_i \frac{du_i}{dz} = n_i e E - \nu_{iz} n_e m_i u_i - m_i n_i \frac{\pi}{2\lambda_i} u_i^2, \quad (2)$$

$$n_e = n_{e0} \exp\left(\frac{e\phi}{kT_e}\right), \quad (3)$$

$$\epsilon_0 \frac{dE}{dz} = e(n_i - n_e), \quad (4)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = -E. \quad (5)$$

여기서  $z$ 는 Fig. 3에서와 같이 플라즈마 발생장치에서 음극과 양극 간을 수직으로 가로지르는 좌표를 나타내고,

Table 1. Variables and parameters used in the paper

Variable	Description	Dimension
$n_i, n_e$	ion/electron number density	$\text{m}^{-3}$
$m_i, m_e$	ion/electron mass	kg
$u_i$	ion fluid velocity	m/s
$\nu_{iz}$	electron-neutral impact ionization frequency	$\text{s}^{-1}$
$\lambda_i$	ion mean free path	m
$\lambda_D$	Debye length	m
$kT_e$	electron temperature	eV
$\phi$	electric potential	V
$E$	electric field	V/m
$Z$	charge multiplicity ( $Q/e$ )	-
$\mu$	Mach number ( $u_i/u_B$ )	-
$u_B$	$\sqrt{kT_e/m_i}$	m/s
$v_{te}$	$\sqrt{8kT_e/\pi m_e}$	m/s
$v_{ti}$	$\sqrt{8kT_i/\pi m_i}$	m/s
$a$	dust radius	m
$\rho_d$	dust mass density, $2.0 \times 10^3$	$\text{kg}/\text{m}^3$
$F_g$	gravitaional force	N
$F_{es}$	electrostatic force	N
$F_{id}$	ion drag force	N
$V_{cathode}$	cathode voltage	V

본 논문에서 다루는 각 변수와 상수들의 설명과 단위는 Table 1에 정리되어 있다. 식 (1)은 전자와 중성종간의 충돌 및 이온화를 고려한 다발(flux)보존식이며, 식 (2)는 이온화 및 이온-중성종 충돌에 의한 운동량 손실을 고려한 운동량 전달 방정식이다. 그리고 식 (3)은 전자의 볼츠만 관계식이고, 식 (4)와 식 (5)는 플라즈마 내 전위에 대한 포와송 방정식이다. 위의 방정식 모음을 자기모순없이 풀기 위한 경계조건은 플라즈마 중심부에서  $dn_i/dz = 0, u_i = 0, E = 0, n_e = n_{e0}, \phi = 0$ , 그리고 벽에서  $\phi = V_{cathode}$ 이다. 위의 미분방정식 모음은 플라즈마 중심부에서 특이점이 생기는데, 이 문제를 해결하기 위해 특이점 근방에서 Taylor 전개를 통한 다항 급수해를 찾은 후 이 해로부터 4차 Runge-Kutta법으로 해를 연장 시킴으로써 전체 해를 구하는 방식을 [6] 도입하였다.

## 2. 티끌입자에 작용하는 여러 힘들

티끌입자들이 플라즈마 경계영역에서 트랩되는 상황을 모사하기 위해서는 대전과정과 대전 후 입자가 받는 힘을 계산해야 한다. 입자의 크기가 (0.1 - 10)  $\mu\text{m}$ 인 경우에는 구형 정전탐침에 적용되는 OLM(Orbital Limited Motion) 이론을 도입함으로써 대전과정을 설명할 수 있다. 티끌입자 주변의 전자와 이온의 밀도를 각각  $n_e$ 와  $n_i$ 라고 하면, 반경이  $a$ 인 티끌입자로 흐르는 전자와 이온 전류는 각각 다음과 같다 [7].

$$I_e = -e\pi a^2 n_e(z) v_{te} \exp\left[\frac{Z(z)e^2}{4\pi\epsilon_0 a k T_e}\right], \quad (6)$$

$$I_i = e\pi a^2 n_i(z) u_i(z) \left[1 - \frac{Z(z)e^2}{2\pi\epsilon_0 a k T_e \mu^2(z)}\right]. \quad (7)$$

이 식들로부터 티끌입자가 가지게 되는 전하량  $Ze$ 는 정상상태를 가정할 경우 부유조건(floating condition)인  $I_e + I_i = 0$ 로부터 구할 수 있다.

이렇게 대전된 티끌입자에는 중력, 정전기력, 이온끌이힘(ion drag force), 기체끌이힘(neutral drag force), 온도차에 의한 열영동력(thermophoretic force) 등 여러 가지 힘들이 작용한다 [8]. 문제를 간단히 하기 위하여, 온도차와 기체흐름의 영향이 다른 힘들에 비해 무시될 수 있도록 실험시스템을 구성하면, 중력, 정전기력, 이온끌이힘만으로 입자에 작용하는 힘균형을 고찰할 수 있다. 먼저 중력과 정전기력은 입자의 질량밀도를  $\rho_d$ 라고 할 경우 간단히

$$F_g = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d g, \quad (8)$$

$$F_{es} = eZ(z)E(z), \quad (9)$$

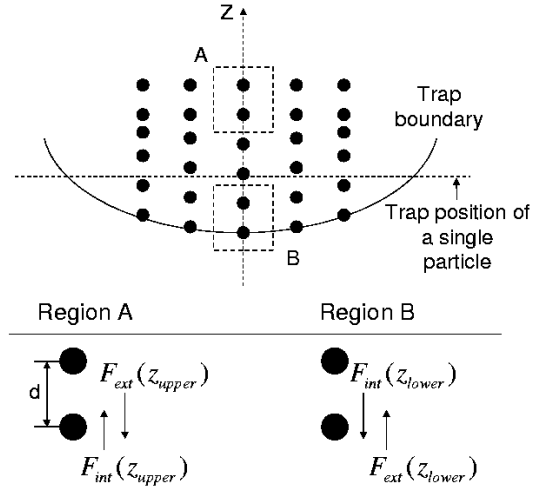


Fig. 2. A diagram showing the direction of external force and internal force in a dust cloud. At the topmost layer and the bottommost layer, force balance on  $z$ -axis is described as the region A and the region B, respectively. In the case of a single dust particle, the equilibrium position corresponds to the dotted line because of no interparticle interaction.

로 표현할 수 있다. 한편, 이온끌이힘의 표현은 다음과 같으며

$$F_{id} = n_i(z) m_i \sigma_m [u_i(z)] u_i(z)^2 G(\chi, \xi) \quad (10)$$

$\sigma_m$ 과  $G(\chi, \xi)$ 는 참고문헌 [9]를 참조하였다. 이온끌이힘을 계산하기 위해서는 이온의 속도분포를 가정해야 하는데, 플라즈마 경계영역에서는 보통 단에너지(mono-energetic) 분포 또는 부유 맥스웰분포(drift Maxwellian)로 근사를 한다. 본 연구에서는 플라즈마 중심부에서의 이온끌이힘을 보다 정확하게 계산하기 위해서 부유 맥스웰분포를 도입하였다.

## 3. 플라즈마 내에서 티끌입자가 이루는 힘균형

앞서 서술한 대전과정을 통해 전하량을 갖게 된 티끌입자는 플라즈마 내에 존재하는 공간전위와 중력, 이온의 흐름에 의해서 힘을 겪게 되는데, 그 힘들들이 적절한 균형을 이루는 공간 상의 어느 특정 위치에 트랩이 된다. 본 연구에서는 단일입자에 대한 힘균형과 입자들이 모여 강한 결합구조를 형성한 입자구름에 대한 힘균형을 입자트랩 모델을 이용한 모델링의 결과와 실험에 의한 측정치를 비교하여 봄으로써 사용한 트랩모델의 정확도를 검증하였다.

먼저 중력  $F_g$ 와 이온끌이힘  $F_{id}$ 가 수직 아래 방향인  $-z$  방향이고 정전기력  $F_{es}$ 가 수직 위 방향인  $+z$  방향을

가리킨다면, 이들 외력에 의해 단일입자가 평형을 이루는 위치는 이들 힘이 균형을 이루는 조건인 아래 식으로부터 찾을 수 있다.

$$\vec{F}_g + \vec{F}_{id} + \vec{F}_{es} = 0. \quad (11)$$

단일입자가 아닌 입자구름에 대한 힘균형 역시 생각해볼 수 있는데, 티끌입자들은 전하를 띠고 있으므로 단일입자의 경우와 달리 이 경우에는 입자들 사이에 존재하는 내력(internal force)을 고려해야 한다. 따라서 입자들 간에 작용하는 내력으로 주변 플라즈마에 의한 데바이(Debye) 차폐가 고려된 데바이-휘켈(Debye-Huckel) 형태의 힘을 도입하였다. 또한 입자구름 내의 입자들이 모두 동일한 거리만큼 떨어져 있다고 가정하면, 입자간 거리와 최대 트랩 시 입자구름의 크기는 입자구름의 제일 바깥쪽에 위치한 티끌입자들에 대한 힘균형 조건을 통해 추정할 수 있다. Fig. 2는 플라즈마 내에 다수의 티끌입자들이 입자간 상호작용과 외력에 의해서 구름을 이루고 있는 모습을 간단히 그려본 것으로, 전극이 아래 쪽에 있다고 가정하면, 입자구름의 위와 아래 최외각 층에서 입자들이  $z$ 축 방향으로 이루는 힘균형은 각각 영역 A와 영역 B처럼 도식화할 수 있다. 우선, 위와 아래 각 최외각 층에 있는 입자들 중 입자 한개가 받는 외력을 살펴보면 다음과 같다. 전극이 아래 쪽에 있다고 가정하고 있으므로 영역 B에 있는 음전하를 가지고 있는 입자가 받는  $+z$  방향의 정전기력은 덮개전위(sheath potential) 때문에  $-z$  방향의 중력과 이온끌이힘에 비해 크기가 커서 총 외력  $F_{ext}$ 의 방향은  $+z$  쪽이 된다. 반면, 영역 A에서는 전극에서 멀기 때문에  $-z$  방향의 중력과 이온끌이힘이 오히려  $+z$  방향의 정전기력보다 커서 총 외력  $F_{ext}$ 의 방향은  $-z$  쪽이 된다. 한편, 최외각층 입자에 작용하는 내력  $F_{int}$ 을 보면 영역 A와 B에서 각각  $+z$  그리고  $-z$  방향이 된다. 이들 내력과 외력이 균형을 이루는 위치에 아래와 위 최외각층 입자들이 각각 존재하게 되므로, 트랩된 입자구름의 경계에 존재하는 입자들에 작용하는 힘균형식을 이용하여 최외각층의 위치를 구할 수 있고, 이것으로부터 입자구름의 폭을 추정할 수 있다. 아래 식 (12)와 식 (13)은 이들 입자가 느끼는 총 내력과 총 외력을 나타낸 것이다.

$$F_{int} = \frac{e^2 Z^2}{4\pi\epsilon_0} \exp\left(-\frac{d}{\lambda_d}\right) \left(\frac{1}{d^2} + \frac{1}{d\lambda_d}\right), \quad (12)$$

$$\vec{F}_{ext} = \vec{F}_g + \vec{F}_{es} + \vec{F}_{id}.$$

여기서  $d$ 는 티끌입자간 거리이다.

### III. 실험장치 구성

실험에 사용한 장치는 직류 방전 플라즈마원으로, 직경이 12 cm, 높이가 7 cm인 원통형 알루미늄 진공용기와 각각 하단과 상단에 설치된 직경 8 cm의 구리재질의 음극과 외경 11 cm, 내경 6 cm의 판형 양극으로 구성되어 있다. 또 티끌입자의 트랩을 쉽게하기 위해 음극 위에 반지모양의 구리재질 부유전극을 추가로 삽입하였다. 방전 시 아르곤 기체압력은 (100 - 300) mTorr, 대표적인 방전전압과 플라즈마 전류는 300 V, 1 mA 정도이고, 탐침측정 시 플라즈마 밀도는  $5.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ , 전자온도는 2.0 eV 정도로 측정되었다. 진동자를 이용하여 제작한 분사팔로 플라즈마 내에 티끌입자를 주입하였는데, 주입한 입자는 SiO<sub>2</sub> 구형, 단분산 입자로 반경이 각각 0.07  $\mu\text{m}$ , 1.55  $\mu\text{m}$ , 2.5  $\mu\text{m}$ 였다. 입자의 가시화를 위해 파장이 632.8 nm인 HeNe 레이저와 확대 광학계를 이용하여 티끌입자의 산란광을 이미징하는 시스템을 구성하였다. 또, 트랩된 입자의 공명 진동주파수를 측정하기 위해서 음극에 소신호 교류를 인가할 수 있도록 하여, 음극에 인가하는 소신호 교류 주파수를 바꾸어가며 진폭변화를 촬영하였다. Fig. 3은 실험장치의 전체적인 구성도이다.

### IV. 결과 및 토의

Fig. 4는 전자온도와 입자반경에 따라 티끌입자의 트랩위치와 그 트랩위치에서 입자가 가지는 전하량을 계산한 것이다. 먼저 Fig. 4(a)를 보면, 전자온도가 일정할 때 입자의 크기가 클수록 음극으로부터 가까운 곳에 그리고 크기가 작은 입자일수록 음극에서 먼 곳에 입자가

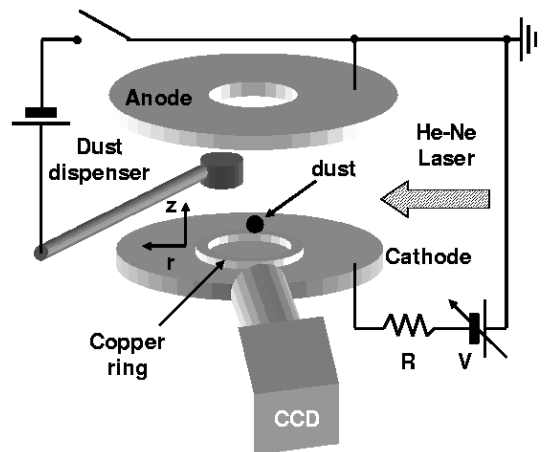


Fig. 3. Schematic of the experimental setup.

위치하게 되며, 트랩이 가능한 입자의 최대크기가 존재한다는 것을 알 수 있다. 이것은 중력과 이온끌이힘이 정전기력보다 입자의 크기에 대한 의존도가 더 크기 때문이다. 즉 입자의 크기와 전하량은 거의 선형적인 비례관계에 있으므로[Fig. 4(b)], 입자의 크기가 클수록 입자의 전하량이 커서 (+z)방향의 정전기력이 크지만, 반면 (-z)방향의 이온끌이힘이 동일한 입자의 크기에 대해 정전기력보다 더 크고 또한 중력 역시 입자의 크기의 세제곱에 비례하여 크기 때문이다.

또, 전자온도가 높을수록 입자가 음극쪽에 가깝게 트랩이 되는데, 이것은 덮개영역의 두께가 전자온도에 대해 반비례하는 관계가 있기 때문에 두께가 작아져서 정전기력이 크게 작용하는 영역도 함께 작아지기 때문이다. Fig. 4(b)에서 보듯이 입자의 전하량은 입자의 크기와 비례하며 전자온도에 민감한데 이것은 식 (6)과 식 (7)의 티끌입자로 흐르는 전자 및 이온의 전류와 전자온도 사이의 함수관계로부터 이해할 수 있다. 계산결과에 의하면 전자온도가 수 eV되는 플라즈마 내에서 수  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 가지는 전하량은 전자 전하량의 수 만배로 나타났는데, 알려진 다른 여러 실험결과와 비교해 보면 비슷한 정도의 값이다.

Fig. 5는 음극 인가전압과 전자온도에 따른 트랩위치와 전하량을 계산한 것이다. 실제 실험결과에 의하면 음

극에 인가하는 직류전압은 측정된 플라즈마 밀도와 거의 비례관계에 있었다( $V_{\text{cathode}} = -280 \text{ V}$  일 때,  $n_p = 1.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ). 그림에서 보듯이 높은 음극전압, 즉 높은 밀도에서 입자의 트랩위치가 음극쪽에 가까운 것은 플라즈마 덮개영역의 두께가 밀도가 낮은 경우에 비해 작기 때문이다. 또, 입자의 전하량이 음극전압, 즉 밀도에 둔감한데 이 이유는 입자의 전하량을 구하는 조건인  $I_e + I_i = 0$ 와 식 (6)과(7)에서 밀도가 상쇄되어 없어지는 것으로부터 이해할 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5를 정리하면, 티끌입자의 트랩위치와 전하량은 전자온도에 민감하게 의존하는 반면, 플라즈마 밀도와 거의 비례관계에 있는 음극전압에는 둔감하게 변화하였다. 즉, 티끌입자의 트랩은 주로 입자의 크기와 전자온도에 좌우됨을 알 수 있었다. Fig. 5(a)에 있는 삼각형 점들은 음극 인가전압을 증가시키면서 관찰한 입자의 트랩위치를 보여주는데 이론적인 계산결과와 잘 일치하였다. 이 결과로부터 본 연구에 사용한 입자트랩 모델의 정확성을 검증할 수 있었다.

Fig. 6(a)는 트랩지점 근방에서 입자가 가지는 알짜외력(net external force)과 이로부터 구한 위치에너지

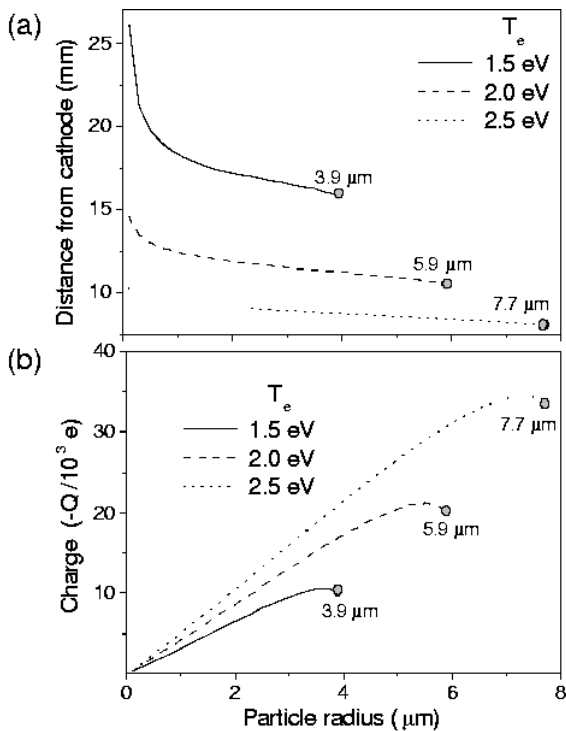


Fig. 4. Calculated (a) trap position and (b) charge with particle size and electron temperature.  $p_{Ar} = 180 \text{ mTorr}$ ,  $V_{\text{cathode}} = -290 \text{ V}$ , and  $T_i = 0.03 \text{ eV}$ .

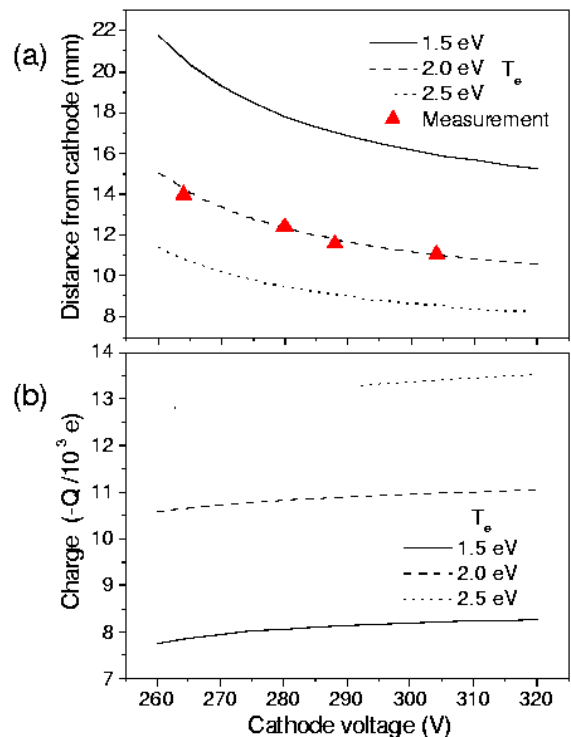


Fig. 5. Calculated (a) trap position and (b) charge as a function of cathode voltage and electron temperature where  $p_{Ar} = 180 \text{ mTorr}$ ,  $a = 2.5 \mu\text{m}$ , and  $T_i = 0.03 \text{ eV}$ . The triangle-shaped symbols represent measured points.  $T_e = 2.0 \text{ eV}$  and the other experimental conditions are the same as those of the calculation.

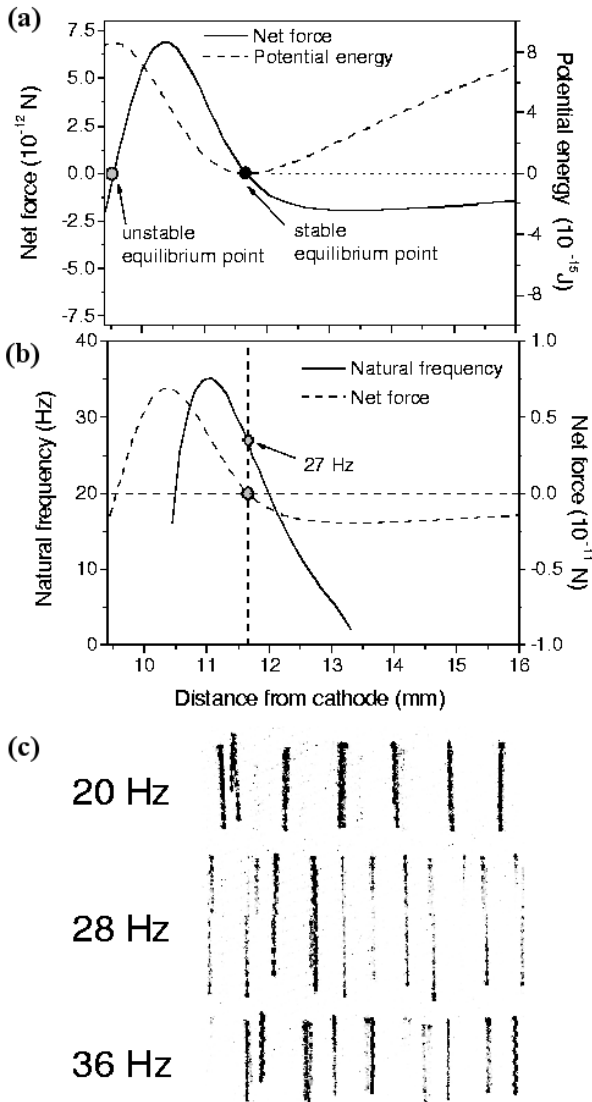


Fig. 6. Calculated (a) net force and potential energy, and (b) resonance frequency where  $p_{Ar} = 180$  mTorr,  $V_{cathode} = -290$  V,  $T_i = 0.03$  eV,  $T_e = 2.0$  eV, and  $a = 2.5 \mu\text{m}$ . (c) Particle trajectories measured at different excitation frequency under  $p_{Ar}=180$  mTorr,  $V_{cathode} = -290$  V, and  $a = 2.5 \mu\text{m}$ .

를 계산한 결과이다. 그림에서 보면 힘균형을 이루는 점, 즉 힘의 총 합이 0이 되는 지점이 음극으로부터 9.5 mm와 12 mm 근방에서 두 군데에 존재한다. 음극으로부터의 거리  $z$ 의 함수인 알짜힘으로부터 구한 위치에너지 분포의 모양을 보면 위의 두 위치 9.5 mm와 12 mm 지점이 각각 불안정(unstable), 그리고 안정 평형점(stable equilibrium)에 해당하는 것을 알 수 있다. 실제로 9.5 mm점 아래에서는 강한 음의 공간전위로 인해서 티끌입자는 양(+)전하를 갖게 되어 음전극 쪽으로 가속된다. 또한 안정 평형점 근처에서 위치에너지는 포물선 모양( $U = k_s z^2/2$ ), 즉 알짜힘은 선형함수( $F = -k_s z$ )의

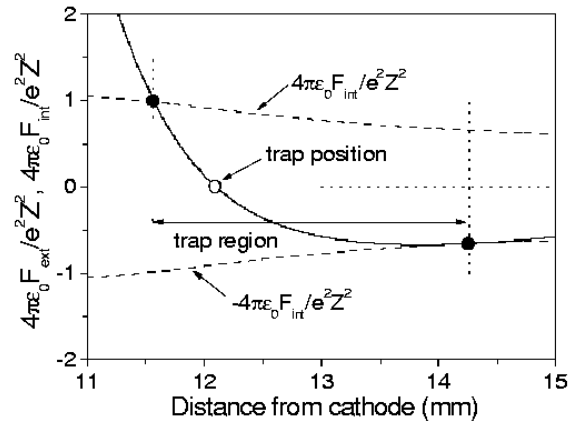


Fig. 7. Net external force (solid) and internal force (dotted). The zero point of external net force (open circle) denotes the equilibrium point of a single particle. The results are calculated under  $p_{Ar} = 180$  mTorr,  $V_{cathode} = -290$  V,  $T_i = 0.03$  eV,  $T_e = 2.0$  eV, and  $a = 1.55 \mu\text{m}$ .

형태를 보이므로 12 mm 지점에 트랩된 티끌입자는 외부 섭동에 대해 단순조화진동을 할 것으로 예상된다. 따라서 위치에너지를 거리에 대해 2차미분해서 상수  $k_s$ 를 구하고 입자의 질량으로 나누어 공명주파수를 계산해 보니 Fig. 6(b)에서와 같이 27 Hz였다. 한편, 실제 플라즈마 내에 주입한 동일 크기의 티끌입자에서 관찰되는 진동운동의 주파수가 모델링의 결과와 일치하는지 알아보기 위해, 음극에 걸어주는 DC 전압에 소신호 교류전압을 겹쳐서 인가하고 인가 교류의 주파수를 변화시켜 보았다. 이때 교류전압의 크기는 입자들이 트랩되는 영역에서 공간전위가 달라지지 않도록 직류전압의 약 1/1000 정도 이하가 유지되도록 하였다. Fig. 6(c)는 인가주파수에 따라  $z$ 축 방향의 입자진동을 레이저 광산란과 확대광학계를 통해서 촬영한 것이다. 촬영 시 카메라의 노출시간을 충분히 길게 잡았으므로 사진에서 각각의 검은 선의 길이가 입자의 진동운동의 진폭이 된다. 그림에서 보면 트랩된 입자들이 실제로 진동운동을 하며 약 28 Hz에서 진폭이 최대가 됨을 알 수 있다. 이로부터 실험적으로 관찰한 공명주파수가 모델링을 통해 계산된 공명주파수와 거의 일치함을 알 수 있었다. 이러한 공명주파수는 음극에 인가되는 직류전압, 즉 플라즈마 밀도가 커질수록 커지며 -400 V일 때 거의 100 Hz 정도까지 증가함을 실험적으로 관찰하였다. 이러한 티끌입자의 역학적 특성과 플라즈마 변수와의 상관관계는 티끌입자 고유의 성질로, 이를 바탕으로 플라즈마 자체의 정보를 알아내는 진단에 이용하는 가능성에 대해서도 연구 중이다.

만약 실험에서와 같이 같은 크기의 티끌입자만 플라즈마 내에 존재하는 경우, 개개의 입자들이 앞서 언급한 외력만 받는다면 모두 음극으로부터 같은 거리( $z =$

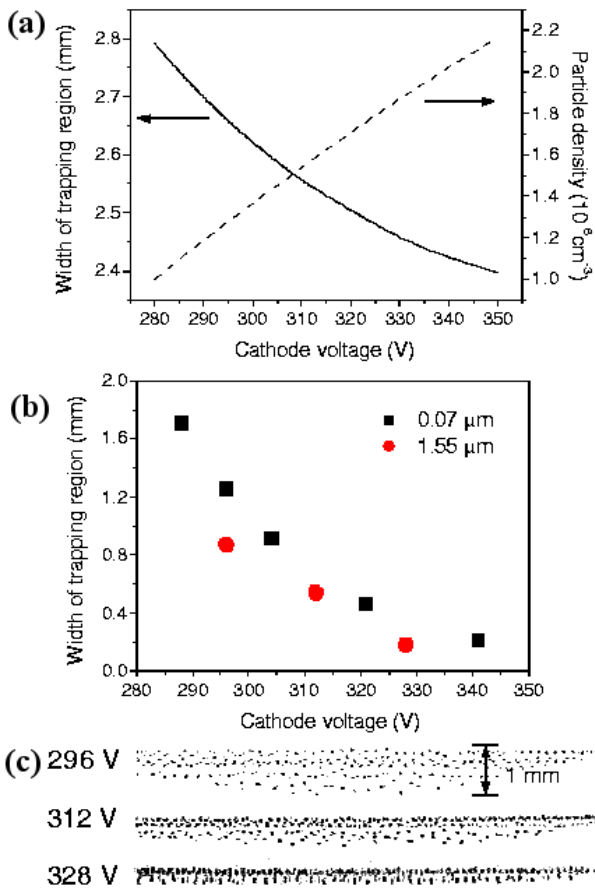


Fig. 8. (a) Calculated cloud size and density of dust particles with cathode voltage where  $p_{Ar} = 180$  mTorr,  $T_i = 0.03$  eV,  $T_e = 2.0$  eV, and  $a = 1.55 \mu\text{m}$ . (b) Measured cloud size in the case of  $a = 0.07 \mu\text{m}$  and  $1.55 \mu\text{m}$ . (c) Image of the particle cloud where each black point represents a dust particle.  $p_{Ar} = 180$  mTorr,  $a = 1.55 \mu\text{m}$ .

$z_0$ )의 한 면에 위치할 것이다. 그러나 입자들은 전하를 띠고 있으므로 입자들 간에 서로 밀어내는 힘이 존재해서 Fig. 1에 보듯이  $z_0$  근처에 퍼져 존재한다. 앞의 II절에서 입자구름 경계에서의 입자간 내력과 외력의 힘균형을 통해, 최대 많은 양의 입자가 트랩되었을 때 입자구름의 크기와 입자간 거리, 밀도 등을 추정할 수 있는 방법에 대해 언급하였는데 Fig. 7은 실제 계산의 예를 보여준다. 그림에서 아래와 위의 두 점선은 음극으로부터의 거리의 함수로 나타낸 내력  $F_{int}$ [식(12)]을 그린 것이고, 중간 실선은 외력  $F_{ext}$ [식(13)]을 나타낸다. 참고로 하나의 입자가 평형을 이루는 평형점을 외력이 0이 되는 지점에 하얀 동그라미로 나타내었다. 먼저 입자구름의 최상위층 위치와 입자간 거리  $d$ 를 외력과 내력이 만나는 조건을 이용해 구한 뒤, 이로부터 최하위층의 위치를 구하여 입자구름의 폭을 알아낸다. 입자간 거리  $d$ 는 음극전압에 따라 (80 - 100)  $\mu\text{m}$  정도이며, Fig. 8(c)로부

터 측정된 최상위층에서의 입자간 거리와 거의 일치하였다. 이때 입자의 밀도는 입자간 거리로부터 산출하였다.

Fig. 8(a)는 이렇게 계산한 음극전압에 따른 입자구름의 폭과 입자의 밀도를 보여주는데, 측정을 통해서도 정성적으로 일치하는 결과를 얻었다[Fig. 8(c)]. Fig. 8(a)와(c)를 보면, 음극전압, 즉 플라즈마 밀도가 클수록 입자구름의 폭은 줄어들고, 입자간 거리가 줄어들며, 입자의 밀도는 증가하고, 입자층의 개수는 줄어든다. Fig. 8(b)와(c)는 실제 실험을 통해 측정된 입자구름의 크기와 모양을 나타낸 것인데, Fig. 8(a)에 있는 모델링을 통한 계산결과와 비교해 보면 음극전압에 따른 경향이 거의 일치하고 대략적인 크기는 비슷하나 계산에 의한 구름폭이 실제 측정값보다 더 큰 것을 알 수 있다. 이 차이에 대한 원인으로 1차원 모델의 한계와 티끌입자 개수 등을 생각해 볼 수 있다. 그러나 이보다도 더 큰 이유는 입자구름 내 입자들 사이의 거리를 동일하게 둔 가정 때문인 것으로 생각된다. 실제 관찰되는 입자구름을 보면 입자간의 거리는 아래방향인 음극쪽으로 갈수록 커진다. 따라서 이 효과를 고려한다면 늘어난 거리로 인한 더 커진 차폐효과로 인해서 입자구름 아래쪽 최외각층에서의 내력은 그 크기가 작아지기 때문에, 외력 곡선과 만나는 점이 더 위쪽에서 형성되어 이론적인 입자구름 크기 추정치는 본 계산보다 작아질 것으로 기대된다.

한편, 음극전압이 커짐에 따라 입자구름의 폭은 계속 감소해서 입자구름이 단일층이 될 때까지 지속되다가, 더 이상 폭의 감소가 불가능해지는 시점부터는 입자구름 중앙에 있는 입자들이  $+r$ 방향, 즉 진공용기 벽쪽으로 이동해 가며 입자구름 중앙에 입자가 없는 공핍영역을 만드는 것이 관찰되었다. 이것은 플라즈마 밀도의 증가에 따라 티끌입자의 밀도가 증가하는 경향성이 계속 유지됨을 시사한다. 현재 이 현상을 설명하기 위한 2차원 모델링이 진행 중에 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 자기모순이 없는 1차원 플라즈마 경계영역 모델을 바탕으로 수치해법과 실험적인 측정을 통해 티끌입자의 트랩현상과 이에 관련한 물리량과 역학적 변수들을 고찰하였다. 전자온도가 고정된 조건에서는 입자크기에 따라 큰 입자일수록 음극에 가깝게 트랩이 되며, 트랩위치에서 티끌입자의 전하량은 입자의 크기와 거의 선형적인 관계를 보여주었다. 반면 입자의 크기가 고정되었을 경우는 전자온도가 클수록 음극쪽에

가깝게 트랩 되었다. 또한 각각의 경우 밀도와 비례하는 음극전압에 대해서는 음극전압이 높을 수록 음극쪽에 가깝게 트랩됨을 알 수 있었다. 이와같은 플라즈마 변수에 따른 입자의 트랩위치 계산결과는 측정치와 정량적으로도 잘 일치함을 보임으로써 모델과 수치해의 적합성을 검증하였고, 덧붙여 티끌입자의 크기와 전자의 온도가 입자의 트랩을 결정짓는 주요 변수들임을 알 수 있었다.

모델링은 티끌입자에 소 진폭 진동을 유도하여 측정된 공명주파수의 측정치를 계산값과 비교함으로써 재차 검증하였다. 이를 위해 입자 트랩 지점에서의 티끌입자의 위치에너지를 두번 미분함으로써 탄성계수를 계산하였으며 이로부터 공명주파수를 계산한 결과 27 Hz로 나타났는데, 이는 실험을 통한 측정치 28 Hz와 잘 일치함을 보였다. 특히 공명주파수는 플라즈마 변수에 민감하게 변화하는 것을 관찰하였으며, 주파수를 측정함으로써 플라즈마의 밀도를 진단할 수 있는 가능성에 대해서도 간략히 논하였다.

티끌입자가 이루는 입자구름 경계에서의 근사적인 힘균형은 입자구름의 z축 방향의 폭과 입자의 밀도를 추정할 수 있게 해주었는데, 비록 근사계산의 한계로 인해 실험적인 측정과 정량적으로 일치하지는 않았으나, 플라즈마 밀도에 비례하는 음극전압에 따라 폭은 줄어들고 밀도는 증가하는 경향은 정성적인 일치를 보여주었다. 향후, 티끌입자에 의한 플라즈마 입자의 손실을 고려하여 모델의 개선이 이루어진다면, 티끌입자의 트랩을 규정짓는 물리량과 플라즈마 변수와의 관계를 보다 명확히 할 수 있어, 티끌입자의 수송현상 연구 뿐 아니라 티끌 플라즈마 진단에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 덧붙여 본 연구를 통해 정립된 티끌입자 트랩모델은 티끌입자의 플라즈마 내 비선형 진동과 같은 티끌입자 트랩과 관련한 현상에 대한 연구를 가능하게 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 기초과학지원연구원의 플라즈마 핵융합 이 용자육성프로그램, 한국과학기술원 기관고유사업, 그리고 한국표준과학연구원 진공기술센터의 부분적인 지원 하에 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] W. W. Stoffels, E. Stoffels, G. M. W. Kroesen and F. J. de Hoog, *J. Appl. Phys.* **74**, 2959 (1993).
- [2] A. Barkan, N. D'Angelo and R. L. Merlino, *Phys. Plasmas* **2**, 3563 (1995).
- [3] G. E. Morfill, H. M. Thomas and M. Zuzic, *Advances in Dusty Plasmas* edited by P. K. Shukla, D. A. Mendis, and T. Desai (World Scientific, Singapore, 1997) p. 99.
- [4] T. Nitter, *Plasma Sources Sci. Technol.* **5**, 93 (1996).
- [5] H-B Valentini, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9**, 574 (2000).
- [6] J. R. Forrest and R. N. Franklin, *J. Phys. D* **1**, 1357 (1968).
- [7] M. S. Barnes, J. H. Keller, J. C. Foster, J. A. O'Neil and D. K. Coultas, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 313 (1992).
- [8] J. Y. Liu and J. X. Ma, *Phys. Plasmas* **4**, 2798 (1997).
- [9] J.-P. Boeuf and C. Punset, *Dusty Plasmas: Physics, Chemistry and Technological Impact in Plasma Processing* edited A. Bouchoule, (Wiley & Sons, New York, 1999). Chap. 1.



## Study on Dust Particle Trapping by Using a Comparative Analysis between Measurements and Collisional Plasma Boundary Modeling

Seongchong PARK, Chang-rae SEON and Wonho CHOE\*

*Gas Discharge Physics Laboratory, Department of Physics,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701*

(Received 16 March 2004)

Dust particles introduced into a plasma are, in general, spatially trapped at the plasma-wall boundary. This particle trapping is known to be a major cause of plasma contamination in plasma-aided micro-device processing. On the other hand, it helps when exploring various particle-related nonlinear phenomena, including oscillatory motion and crystallization. The characteristics of particle trapping, such as the trap position, the oscillation frequency, and the dust cloud width, were studied for various plasma conditions and dust-particle sizes by using a comparative analysis between measurements and 1-D collisional plasma modeling including ionization and collision terms. The validity of the model was demonstrated by showing agreement between the modeling results and the experimental observations. For the particle trapping and oscillation experiments, the known-sized SiO<sub>2</sub> particles with radii of 0.07  $\mu\text{m}$ , 1.55  $\mu\text{m}$ , and 2.5  $\mu\text{m}$  were injected into a low - pressure argon DC glow discharge.

PACS numbers: 52.27.Lw, 52.40.Kh, 52.27.Gr

Keywords: Dusty plasma, Particle trap, Collisional sheath

\*E-mail: wchoe@kaist.ac.kr